

## О ВЛИЯНИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕСТИ ПОРАЖЕНИЙ ПРИ ЯДЕРНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЯХ И НА ПОСЛЕДСТВИЯ ДРУГИХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Б. А. Бенецкий

*Статья посвящена формированию логнормальных распределений тяжести последствий аварий и чрезвычайных ситуаций под влиянием человеческого фактора, который определяет реакцию людей на доминирующее внешнее воздействие. Мерой служит коэффициент влияния человеческого фактора, относительная дисперсия которого есть универсальная величина, определяющая компактность распределения тяжести последствий.*

**Ключевые слова:** человеческий фактор, аварии, чрезвычайные происшествия.

Количественные характеристики процессов, зависящих от психофизических, интеллектуальных, профессиональных, социальных и прочих индивидуальных особенностей людей, по природе своей являются случайными величинами. Известно, что при чрезвычайных ситуациях, техногенных авариях и природных катаклизмах распределение тяжести поражений  $y$  описывается логарифмическим нормальным (логнормальным) законом:

$$\frac{dN}{dy} = \frac{\exp\left(-\frac{(\ln y - m)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma y} \quad (1)$$

с параметрами:  $m$  и  $\sigma$ , из которых первый равен среднему логарифму случайной величины  $y$ , которая является мерой тяжести последствий, а второй характеризует разброс её логарифмов относительно этого среднего значения. Ранее нами был предложен подход, объясняющий формирование логнормального распределения тяжести поражений при ядерных и радиационных авариях (в том числе и в Чернобыле [1]) и основанный

на учете доминирующей роли “человеческого фактора” (ЧФ), а также предложена соответствующая математическая модель [2, 3]. Согласно этому подходу у одних людей формируется пренебрежение риском облучения, у других – повышенная настороженность, у третьих – страх, понижающий способность рационального мышления. Все эти причины должны увеличивать интенсивность накопления поражений, т.е. приводить к увеличению мощности дозы  $\dot{D}$  при накоплении дозы  $D$ . При этом изменение условий облучения во времени определяется временной зависимостью мощности дозы в окружающей среде (амбиентной дозы)  $f(t)$ . Это приводит к уравнению

$$dD = \alpha D f(t) dt, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – учитывающий влияние ЧФ коэффициент игнорирования радиационного риска, численно равный относительному увеличению дозы в единицу времени при неизменных условиях облучения. В этой модели относительная изменчивость индивидуальной дозы при перемещении в пространстве учитывается величиной индивидуального коэффициента игнорирования риска (данный индивид пренебрегает интенсивностью облучения или, наоборот, избегает пространств с высокими мощностями амбиентных доз). Последнее относится и к руководителям работ, что должно существенно усиливать влияние ЧФ. Уравнение (2) можно назвать также уравнением баланса, где  $\alpha$  определяет баланс между относительным (по отношению к уже накопленной) приращением индивидуальной дозы и относительным (по отношению к начальной) приращением дозы в окружающем пространстве. На основании решения уравнения (2) и стандартных преобразований можно получить [2, 3] распределение (1) для доз гамма-излучений и активности инкорпорированного йода-131 (смотри верхний ряд на рис. 1).

Для подтверждения общности и объективности проявления человеческого фактора при экстремальных обстоятельствах было бы желательно распространить изложенный подход и на другие ситуации и процессы, когда задача получения количественных характеристик не столь сложна, как при ядерных авариях, а сами данные не столь уникальны. Жизнь предоставляет такие возможности, в частности, в таком виде деятельности, как пожарное дело, где чрезвычайные ситуации являются массовыми, а статистика случаев вполне репрезентативна. Примером формирования под воздействием ЧФ логнормального распределения характеристики последствий (в этом случае – времени прибытия на пожар) служит процесс оперативного реагирования при продвижении к горящему объекту в условиях “тормозящей” городской среды (гистограммы на рис. 1). Чрезвычайность такой ситуации иллюстрируется, в частности, тем, что в

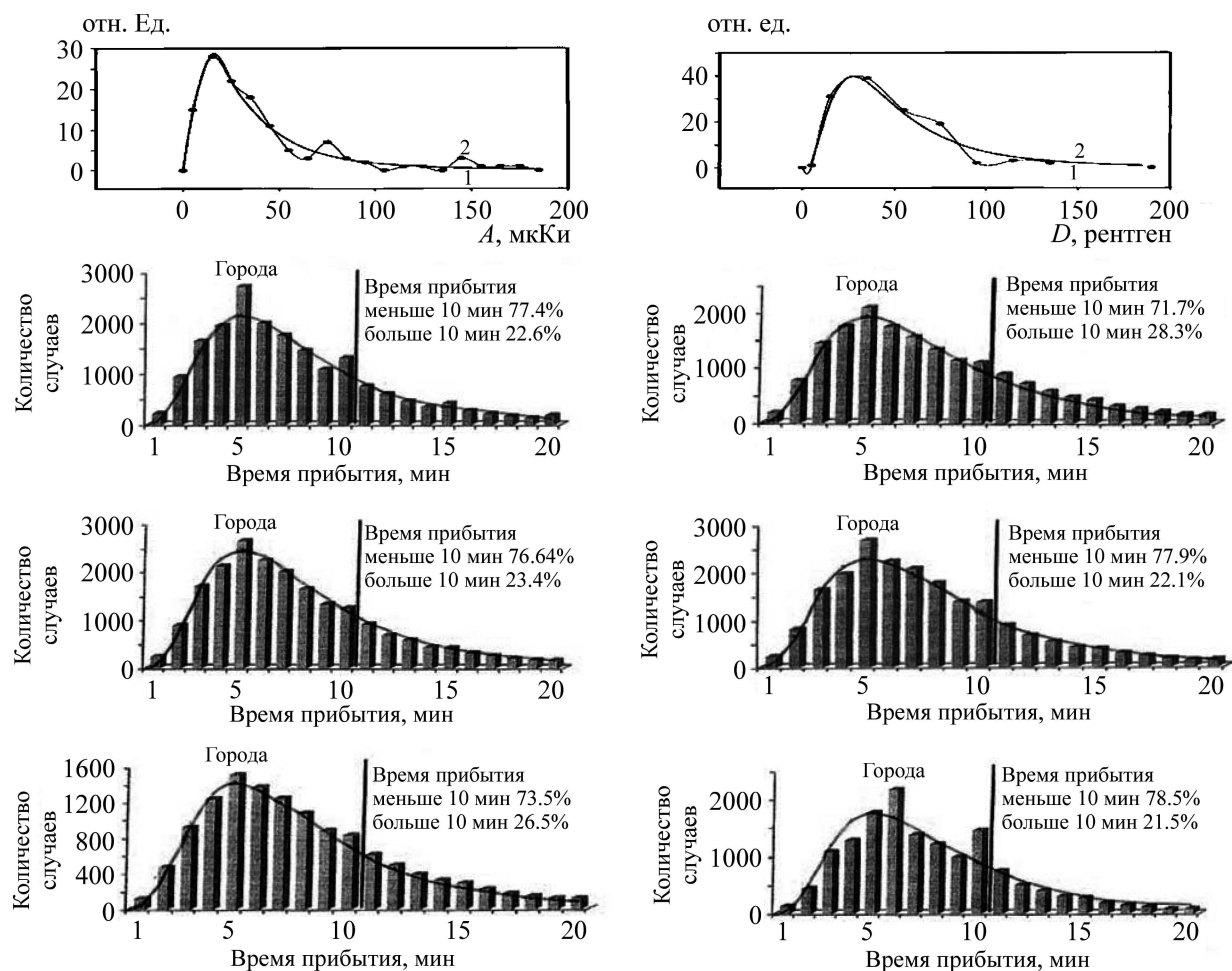


Рис. 1: Верхний ряд, слева. Распределение активности радиоioda в щитовидных железах у 122 членов экипажа подводной лодки после аварии ЯЭУ. По оси абсцисс – активность йода-131, отнесенная к первому дню после аварии. По оси ординат – количество облученных на интервал активности. Верхний ряд, справа. Распределение доз гамма-излучения у 122 членов экипажа подводной лодки после аварии ЯЭУ. По оси абсцисс – величина дозы. По оси ординат – количество облученных на интервал доз. Кривые без точек – расчет по формуле (1), с точками – данные наблюдений. Гистограммы. Сравнение предсказаний модели с фактическими распределениями времен оперативного реагирования в городах в 2004–2008 гг. по шести региональным центрам МЧС России, слева направо и сверху вниз: Центральному, Сибирскому, Уральскому, Приволжскому, Южному, Северо-Западному. Все данные наблюдений описываются универсальной кривой распределения с одним набором параметров.

интервале времени прибытия от 1 до 10 минут в Москве в 2000–2010 гг. вероятность гибели людей на пожарах возрастала в 2.57 раза и составляла 5.2 человека на 100 пожаров [4]. Основной математической модели этого процесса прибытия на пожар [5] является уравнение

$$dt = \eta tg(r)dr, \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $r$  – расстояние вдоль  $\mathbf{r}$  – радиус-вектора, проведенного из точки А, где находится пожарное депо в точку Б – место возникновения пожара. Множитель  $\eta$  – коэффициент влияния человеческого фактора на скорость продвижения. Безразмерная функция  $g(r) = ds/dr$  учитывает насколько приращение реально пройденного пути  $ds$  больше смещения  $dr$  в направлении  $\mathbf{r}$ . Сравнение предсказаний модели (универсальные кривые на рис. 1) с фактическими распределениями времен оперативного реагирования в городах шести регионов России в 2004–2008 гг. (гистограммы на том же рисунке) [6] говорит в пользу адекватности предлагаемой модели. Универсальность кривых (все данные наблюдений описываются формулой (1) с параметрами  $m = 1.9418$  и  $\sigma = 0.5765$ ) является естественным следствием равенства распределений индивидуальных качеств людей в различных регионах.

Кроме перечисленных выше случаев описания воздействия ЧФ аналогичные результаты были также получены для процессов:

- оперативного реагирования по стране в целом в 2006–2007 гг. (для  $t \leq 20$  минут);
- оперативного реагирования по стране в целом в 2008–2010 гг. (после введения нового принципа территориального деления зон ответственности, для  $t \leq 20$  минут);
- и даже для формирования количества единиц техники, используемой на пожарах по стране в целом в 2010 году [7].

В последнем случае изменение числа единиц техники на пожаре описывалось уравнением

$$dn = \psi n K(t) dt, \quad (4)$$

где  $n$  – число машин, используемых на пожаре,  $\psi$  – коэффициент влияния человеческого фактора на численность единиц техники,  $K(t)$  – функция, учитывающая категорию пожара в данный момент времени  $t$  (меняется ступенчато при изменении категории пожара). Уравнение (4) полностью аналогично уравнениям (2) и (3).

В упомянутых выше математических моделях, описывающих проявление ЧФ при конкретных чрезвычайных ситуациях, общими чертами являются следующие:

- формирование количественной характеристики последствий этих ситуаций  $y(x)$  при доминирующем влиянии человеческого фактора под воздействием экстремальных

внешних условий (внешней среды);

– последовательность процесса формирования последствий определяется координатой  $x$  (временем или расстоянием);

– влияние внешних условий и их изменения относительно их первоначальной величины описывается безразмерной функцией  $G(x)$ , характеризующей изменение воздействия внешнего фактора, доминирующего при данной чрезвычайной ситуации.

Для обобщения частных моделей введем в рассмотрение функцию  $H(y)$ , характеризующую реакцию человека на формирование последствий воздействия ЧФ при достигнутом уровне последствий  $y(x)$ .

В качестве приближения модели будем считать, что приращение характеристики последствий  $dy$  пропорционально значению функции влияния человеческого фактора  $H(y)$ , воздействию внешних условий  $G(x)$  и приращению координаты  $dx$

$$dy = H(y) \times G(x) dx. \quad (5)$$

Тогда, если разложить функцию  $H(y)$  в ряд, ограничиться первым приближением при условии  $H(0) = 0$  (нет влияния ЧФ, нет последствий) и обозначить величину  $\frac{dH}{dy}(0) = \zeta$ , получим уравнение для определения количественной характеристики последствий влияния ЧФ:

$$dy = \zeta y G(x) dx. \quad (6)$$

В линейном приближении для  $H(y)$  производная  $\frac{dH}{dy} = \frac{dH}{dy}(0) = \text{const}$ . И потому константа  $\zeta$ , коэффициент влияния человеческого фактора, в таком приближении является единственной и основной (вместо функции  $H(y)$  в (5)) характеристикой влияния индивидуальных особенностей человека на формирование последствий чрезвычайной ситуации. Как и для всякой модели качество такого приближения определится сравнением с данными наблюдений. Будем считать, что разброс индивидуальных коэффициентов  $\zeta$  для какой-либо группы людей, подобно иным (психофизиологическим, антропометрическим, медицинским) характеристикам, описывается гауссовым распределением с параметрами  $\bar{\zeta}$  и  $\sigma_{\zeta}$ . Тогда на основании решения уравнения (6) и общих правил преобразования распределений можно показать, что должно формироваться логнормальное распределение (1) с параметрами

$$m = \ln y_0 + \bar{\zeta} \times x_{\text{eff}} \quad (7)$$

и

$$\sigma = \sigma_{\zeta} \times x_{\text{eff}}, \quad (8)$$

где  $y_0$  – уровень последствий, накопленных к началу доминирования человеческого фактора  $x_a$ , а  $x_{\text{eff}}$  – эффективное изменение координаты, равное

$$x_{\text{eff}} = \int G(x)dx, \tag{9}$$

где интегрирование проводится по интервалу  $x$  от  $x_a$  до максимального значения  $x_{\text{max}}$ .

Т а б л и ц а 1

Величины, входящие в уравнение (6):	Количественная характеристика последствий процесса $y$	Коэффициент влияния ЧФ в процессе $\zeta$	Функция влияния внешних условий $G(x)$	Координата $x$
При радиационной аварии это:	Индивидуальная доза $D$	Коэффициент игнорирования радиационного риска $\alpha$	Мощность дозы внешнего облучения $f(t)$	Время $t$
При радиационной аварии это:	Активность радиойода $A$	Коэффициент игнорирования радиационного риска $\alpha$	Мощность дозы внешнего облучения $f(t)$	Время $t$
При реагировании на пожар это:	Время оперативного реагирования (прибытия на пожар) $t$	Коэффициент влияния ЧФ на время прибытия на пожар $\eta$	Влияние городской застройки $g(r)$	Расстояние $r$
При использовании техники на пожаре это:	Количество единиц техники на пожаре $n$	Коэффициент влияния ЧФ на количество единиц техники на пожаре $\psi$	Категория пожара $K(t)$	Время $t$

Таблица 1 демонстрирует соотношение величин, входящих в обобщающее уравнение (6) (1 строка таблицы), и их частных проявлений в конкретных ситуациях и процессах (2–4 строки). При подстановке в уравнение (6) величин из табл. 1 мы получаем уравнения (3)–(5) и, соответственно, выводы, полученные из анализа их решений. “Физический смысл” коэффициента  $\zeta$  следует из уравнения 6: коэффициент влияния человеческого фактора  $\zeta$  численно равен относительному увеличению приращения характеристики последствий  $\Delta y/y$  при изменении координаты на единицу и неизменных внешних условиях ( $G(x) = 1$ ). Размерность  $\zeta$  равна размерности величины, обратной координате:  $\dim \zeta = \dim x^{-1}$ . Из этой формулировки и соотношения размерностей вытекают соответствующие формулировки и соотношения для коэффициентов  $\alpha, \eta, \psi$  в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 2

Чрезвычайная ситуация	Процесс, измеряемая величина, единица измерений	Параметры логнормального распределения		Характеристика влияния ЧФ $\zeta$	Относительная дисперсия коэффициента влияния ЧФ $\sigma_\zeta/\bar{\zeta}$
		$m$	$\sigma$		
Неконтролируемое повышенное сочетанное аварийное облучение на ПЛА, 1961 г.	Формирование индивидуальных доз общего гамма-излучения, рентген (Р)	4.01	0.74	Коэффициент игнорирования радиационного риска $\alpha$	$\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = 0.38$
Неконтролируемое повышенное сочетанное аварийное облучение на ПЛА, 1961 г.	Накопление радиойода в щитовидной железе пострадавших, мкКи	3.33	0.85	Коэффициент игнорирования радиационного риска $\alpha$	$\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = 0.46$
Оба процесса как 2 способа оценки относительной дисперсии $\alpha$ $\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = 0.42 \pm 0.04$					
Пожары в городах шести регионов РФ в 2004–2008 гг.	Формирование времени оперативного реагирования (прибытия на пожар), мин.	1.942	0.577	Коэффициент влияния ЧФ на время прибытия на пожар первого пожарного караула $\eta$	$\sigma_\eta/\bar{\eta} = 0.38 \pm 0.08$
Пожары в городах по стране в целом в 2006–2007 гг.	Формирование времени оперативного реагирования (прибытия на пожар), мин.	1.942	0.577	Коэффициент влияния ЧФ на время прибытия на пожар первого пожарного караула $\eta$	$\sigma_\eta/\bar{\eta} = 0.38 \pm 0.08$
Пожары в городах по стране в целом в 2008–2010 гг.	Формирование времени оперативного реагирования (прибытия на пожар), мин.	1.878	0.538	Коэффициент влияния ЧФ на время прибытия на пожар первого пожарного караула $\eta$	$\sigma_\eta/\bar{\eta} = 0.36 \pm 0.07$
Пожары в городах по стране в целом в 2010 г.	Формирование количества единиц техники на пожаре, отн.ед.	0.730	0.530	Коэффициент влияния ЧФ на количество единиц техники на пожаре $\psi$	$\sigma_\psi/\bar{\psi} = 0.39 \pm 0.16$

В качестве примера общности результатов влияния ЧФ при совершенно разных по своей сущности ситуациях и процессах на рис. 1 показаны логнормальные распределения характеристик последствий для ситуаций, отраженных в трех верхних строках табл. 1. Очевидна близость этих распределений к реальным данным наблюдений (точкам или гистограммам). По-видимому, по общей причине (влияние ЧФ и наличие одного доминирующего внешнего фактора) логнормальное распределение последствий формируется также и при природных катаклизмах, и при техногенных авариях, и при иных чрезвычайных ситуациях. Если же при чрезвычайной ситуации одновременно действуют два сильных и соизмеримых внешних фактора, распределение последствий отличается от логнормального. Подтверждающим примером служит кардинальное различие наблюдаемых распределений времени оперативного реагирования на сигнал о пожаре в городах и сельской местности [6]. Причиной тому, вероятно, является наличие в сельской местности, в отличие от городов, еще и второй главной русской беды (дороги).

Сколь широк разброс коэффициента влияния ЧФ (какова его относительная дисперсия в единицах среднего значения  $\sigma_\zeta/\bar{\zeta}$ ) можно оценить на основании соотношений (7) и (8). Из них следует:

$$\sigma_\zeta/\bar{\zeta} = \sigma/(m - \ln y_0). \quad (10)$$

При оценках по этой формуле наибольшая неопределенность возникает из-за параметра  $y_0$ . Однако, поскольку зависимость от него слабая, логарифмическая, в большинстве случаев оценивался интервал, в пределах которого могло находиться значение  $y_0$ , а ширина этого интервала служила мерой ошибки относительной дисперсии  $\sigma_\zeta/\bar{\zeta}$ . Результаты таких оценок приведены в табл. 2. Из её содержания следует, что, несмотря на различие ситуаций и процессов (столбцы 1, 2), параметров логнормальных распределений, (столбец 3), размерностей и “физических смыслов” (смотри комментарий к табл. 1) коэффициентов влияния ЧФ для каждого процесса (столбец 4), значения относительной дисперсии этих коэффициентов в пределах ошибок практически совпадают (столбец 5). Такое совпадение представляется веским количественным доводом в пользу того, что относительная дисперсия коэффициента влияния ЧФ – это универсальная величина, служащая общей мерой разброса индивидуальных свойств человека. Она достаточно велика и составляет по нашей оценке

$$\sigma_\zeta/\bar{\zeta} = 0.40 \pm 0.05. \quad (11)$$

При этом следует иметь в виду, что значение величины (11) определяется как основным на математической модели алгоритмом расчета, так и статистическими данными



ми по определенным группам людей. Последние (данные по группам) являются результатом выборки из генеральной совокупности (показатели для всех людей). В рассматриваемом случае это – коллективы высоко работоспособных мужчин репродуктивного возраста, ведущих здоровый образ жизни, профессионально хорошо подготовленных и прошедших определенный, в том числе медицинский, контроль. Было бы интересно сопоставить результат (11) с результатами, полученными с другими частными выборками, имеющими иные возрастные, гендерные и социальные характеристики.

Полученные результаты говорят в пользу того, что логарифмическое нормальное распределение тяжести последствий аварий и чрезвычайных ситуаций является объективным следствием влияния человеческого фактора, когда в основном он определяет реакцию на доминирующее внешнее воздействие. При этом мерой служит коэффициент влияния человеческого фактора, относительная дисперсия которого, по-видимому, есть универсальная величина, в свою очередь определяющая компактность распределения тяжести последствий. Эти результаты могут оказаться полезными при прогнозировании и подготовке к ликвидации последствий аварий и происшествий, в том числе, – аварий ядерной и радиационной природы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Васильченко, А. В. Носовский и др., в сб. *Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений*. Под ред. Филатова В.Н., Бенецкого Б.А., Гогина Е.Е. ( М., ЦНИИТЭИЛЕГ-ПРОМ, 1994), с. 26.
- [2] Б. А. Бенецкий, *Влияние человеческого фактора на формирование тяжести поражений при радиационных авариях. в: Средства спасения. Противопожарная защита*. (Москва, ВДПО, спецвыпуск 2011), с. 69.
- [3] Б. А. Бенецкий, Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(1), 34 (2012).
- [4] Н. Брушлинский, С. Соколов и др., Фактор времени. Пожарное дело № 4, 26 (2012).
- [5] Б. А. Бенецкий, “Влияние человеческого фактора на время оперативного реагирования на сигнал о пожаре”. *Тезисы докладов XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института 3-4 июля 2012 г.* Ч. 2, Балашиха МО, Россия (М., ВНИИПО, 2012), с. 87.
- [6] В. А. Востротин, Совершенствование системы реагирования на сигнал о пожаре. *Пожарная автоматика 2011*. (Москва, ВДПО, 2011), с. 8–11.

- [7] Пожары и пожарная безопасность в 2010 году: Статистический сборник. Под общей редакцией В.И. Климкина (М., ВНИИПО, 2011).

Поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.